

Cambio Climático e Impacto en los Aeropuertos

*Raquel Salazar Víquez
Coordinadora de Meteorología Aeronáutica IMN
Coordinadora CRF CR (OMM)
Co- Presidente Grupo de Expertos en Aviación OMM*

Setiembre 2026



MINISTERIO DE
AMBIENTE Y ENERGÍA

GOBIERNO
DE COSTA RICA

INSTITUTO
METEOROLÓGICO
NACIONAL



Cambio Climático

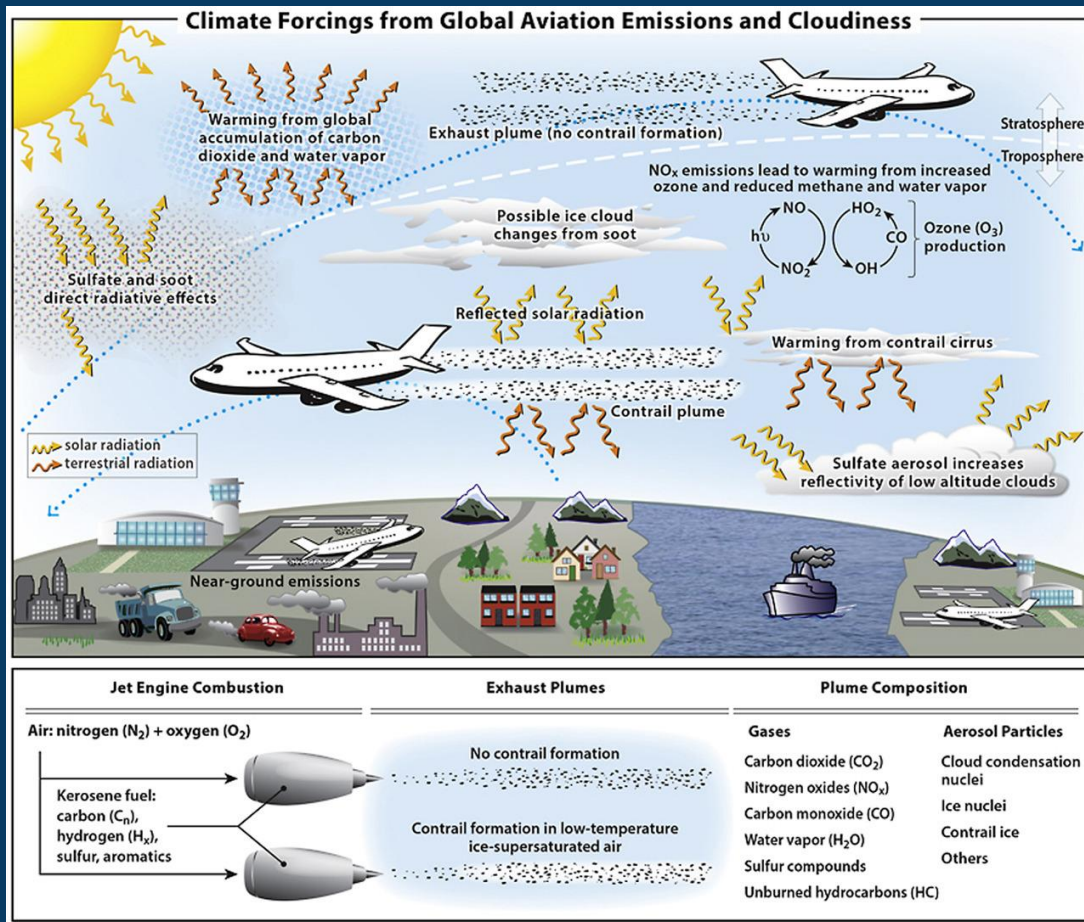
Descripción de la situación

El cambio climático se refiere a una variación estadísticamente significativa en el estado medio del clima o en su variabilidad, que persiste durante un período prolongado (habitualmente décadas o más)

IPCC (2021). *Cambio Climático 2021: Bases físicas.* Contribución del Grupo de trabajo I al Sexto Informe de Evaluación del IPCC

Aumento de las temperaturas medias globales
Alteraciones en los patrones de precipitación

Desplazamiento de las corrientes en chorro
Incremento en la frecuencia e intensidad de fenómenos meteorológicos extremos.



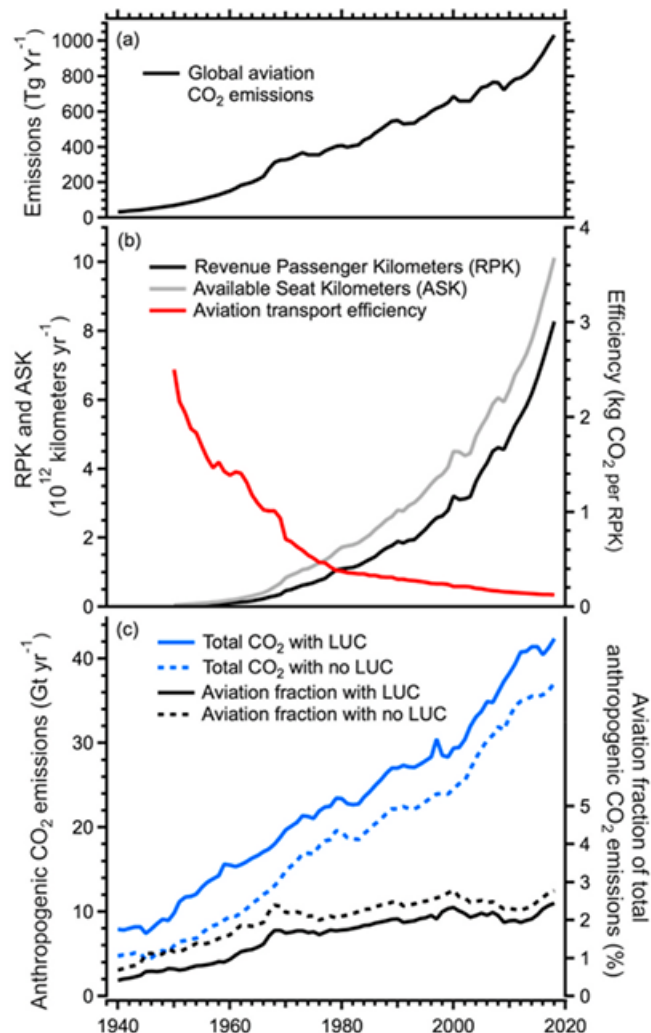
Conexión con la aviación (CO_2 , NO_x , contrails)

La aviación civil internacional es simultáneamente una fuente significativa de emisiones que contribuyen al cambio climático principalmente

Dióxido de carbono (CO_2)
Óxidos de nitrógeno (NO_x)
Estelas de condensación (contrails)

Sector altamente vulnerable a los efectos del cambio climático.

Fuente: Lee, D. S., et al. (2021). *The contribution of global aviation to climate change over the 20th century*. *Atmospheric Environment*, 244, 117834.



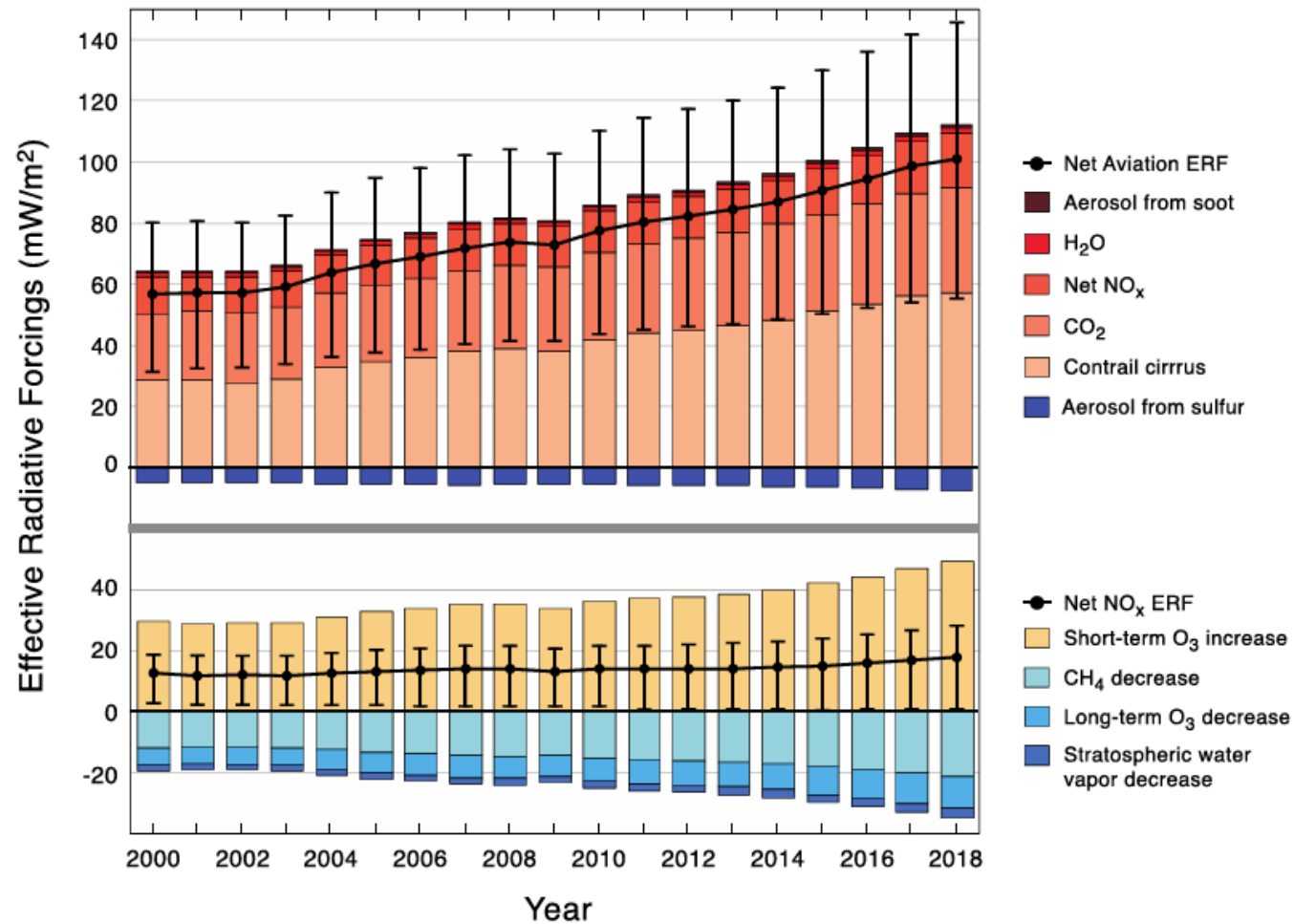
Desde 1960 crecen en promedio unas 15 Tg (millones de toneladas) de CO₂ cada año, unos 3 % anuales. La aviación emite ahora varias veces más que en 1960

El factor de ocupación (RPK/ASK) pasa de ~60 % a 82 % ⇒ los aviones vuelan más llenos.

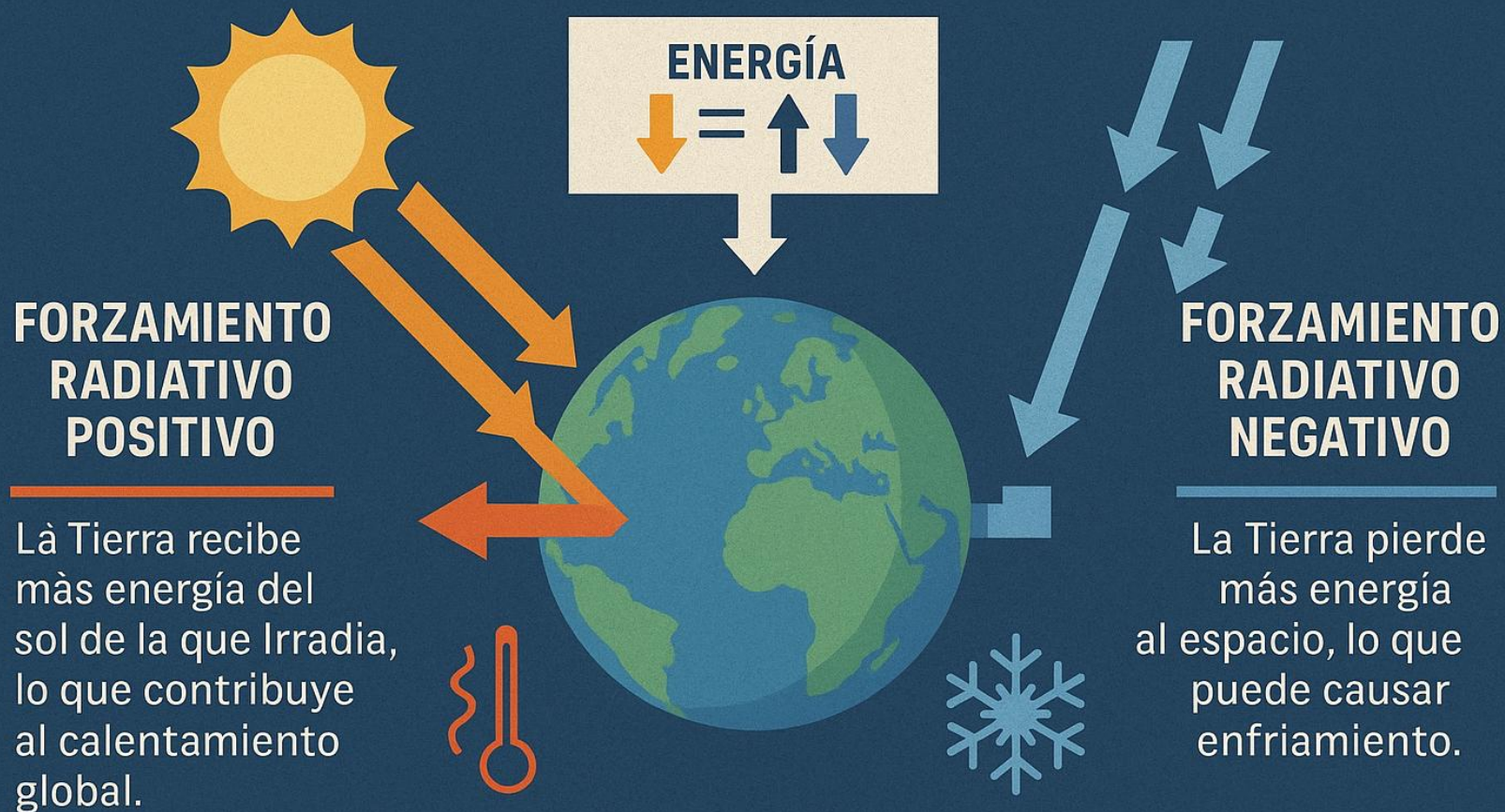
Eficiencia: la curva roja cae: **cada pasajero transportado genera menos CO₂** gracias a motores más eficientes y mejores operaciones.

Las emisiones globales de CO₂ suben fuerte, pero la aviación sigue siendo una pequeña fracción (≈ 2-3 %). Aunque el sector crece, otras fuentes (energía, industria, etc.) siguen dominando

Global Aviation ERFs from 2000 to 2018



FORZAMIENTO RADIATIVO DE LA TIERRA



IMPACTOS METEOROLÓGICOS GLOBALES



Corriente en chorro

TAC/CAT

Temperatura y densidad del aire

Precipitaciones

Célula de Hadley

Vientos en superficie

JET STREAMS

Bandas de vientos rápidos



Fast-Get-Faster: $2.1 \pm 0.5\%$
por cada grado de cambio
en la temperatura media
global de la superficie

En la parte superior de la
troposfera (10-12 km de
altitud).

- Al cambiar las diferencias de temperatura en la atmósfera, pueden modificarse la velocidad, posición y trayectoria del Jet Stream.
- Acortar o aumentar los tiempos de vuelo, modificar rutas y consumo de combustible.

“Ondulación” (waviness) :
incrementar significativamente -
cambio climático

Impacto: Tiempos de vuelo alterados y aumento de TAC.
Aumento de Fenómenos Meteorológicos Severos

Emergencia de la Señal: Datos de reanálisis no son aún estadísticamente significativas, los modelos climáticos :“fast-get-faster” **emergerá en ambos hemisferios para el año 2050**

Moist get moister

Más calentamiento →
Más humedad tropical



Imagen generada con IA

TAC (CAT)

¿Porqué aumenta?

El calentamiento global intensifica los gradientes de temperatura cerca de la tropopausa, lo que refuerza el cizallamiento vertical del viento (la chispa que genera la CAT)

El fenómeno se amplifica sobre las principales rutas de vuelo (ej. Atlántico Norte) donde confluyen los jets polares y subtropicales.

Escenario	2050-2080
TAC Ligera	≈ +60 %
TAC Moderada	≈ +95 %
TAC Severa	≈ +150 %

Datos tomados de: Global Response of Clear-Air Turbulence to Climate Change (Williams, P. D., Storer, L. N. & Joshi, M. M, 2017)

Temperatura y densidad del aire

Cuando la temperatura sube:



El aire pierde densidad.

- El aire pierde densidad.



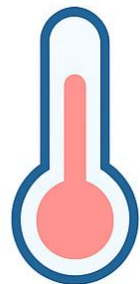
Las alas generan menos sustentación a la misma velocidad.

- Se eleva la altitud de densidad efectiva del aeropuerto.



Con el calentamiento global:

- Los días de calor extremo serán más frecuentes.
- Restricciones operativas crecientes
- Pérdidas económicas cada vez mayores



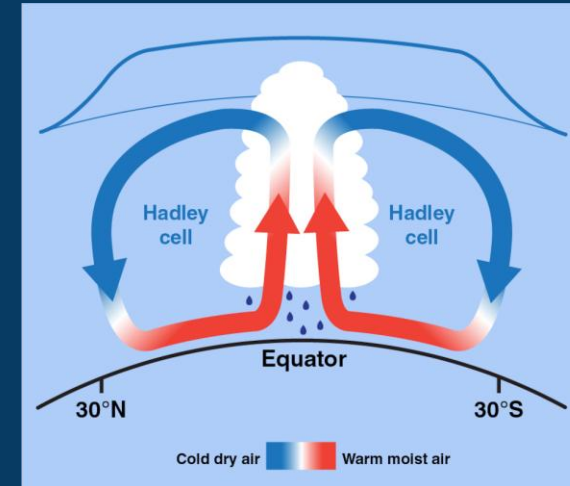
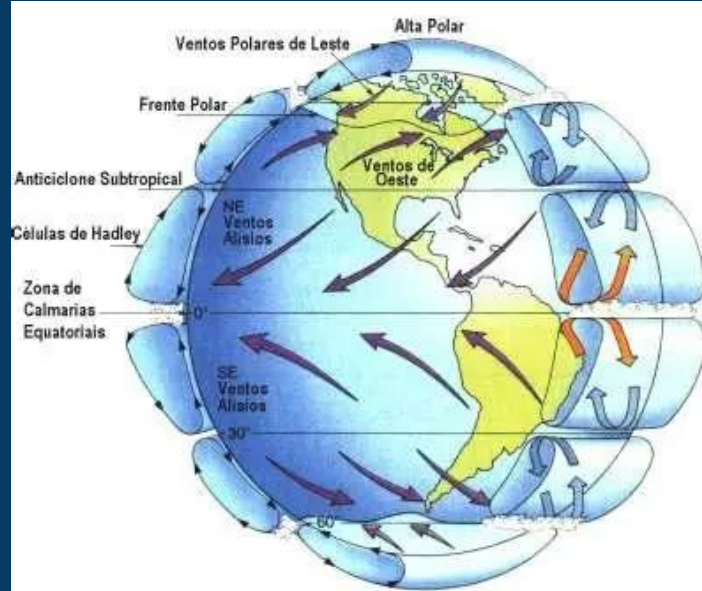
El calentamiento global está llevando a un **aumento en la intensidad de las precipitaciones**, Fenómeno descrito como "nunca llueve pero diluvia".

Incrementa el riesgo de inundaciones, lo que puede comprometer la operatividad de los aeropuertos y sus infraestructuras.

Los ciclones tropicales (tifones y huracanes) se proyecta que serán más intensos, con mayores velocidades de viento pico y precipitaciones más fuertes

Baja visibilidad
Pistas resbaladizas o inundadas
Ralentización de carga,
Reabastecimiento y navegación de vehículos de apoyo.
Fiabilidad del cronograma

Célula de Hadley y desplazamiento de zonas tropicales



Expansión documentada de 0.5° por década hacia los polos, alterando zonas de lluvia tropical (Hu et al. (2018))

El aeropuerto frente al cambio climático

El aeropuerto no es solo una pista: es un sistema operativo expuesto al clima.

Temperatura
extrema

Precipitación
intensa

Viento y
tormentas

Infraestructura
y continuidad

Planificación
y adaptación



Señales climáticas relevantes para aeropuertos

Cambios observados y esperados

- Aumento de las temperaturas medias y de los extremos de calor.
- Alteración de los patrones de precipitación y eventos más intensos.
- Incremento de fenómenos meteorológicos extremos.
- Cambios en corrientes en chorro, vientos y zonas tropicales.



Impacto operacional: seguridad y continuidad

Efectos directos en el aeropuerto

- Mayor probabilidad de demoras, desvíos y cancelaciones.
- Reducción de márgenes operativos en días de calor, viento o baja visibilidad.
- Mayor complejidad para operaciones en tierra: carga, combustible, vehículos y personal.
- Más presión sobre planes de emergencia y continuidad del servicio.



Temperatura: altitud de densidad y desempeño

Cuando el aire se calienta, disminuye su densidad

Efectos sobre despegue y carga



- Menor densidad del aire: las alas generan menos sustentación a la misma velocidad.
- Aumenta la distancia necesaria para despegar y la altitud de densidad efectiva.
- En pistas limitadas puede requerirse reducción de peso: pasajeros, carga o combustible.
- Los días de calor extremo pueden generar pérdidas operativas y económicas.

El calor convierte una variable meteorológica en una restricción operacional.

Precipitación extrema e inundaciones

“No siempre llueve más, pero puede llover más intenso”

Riesgos principales

- Pistas resbaladizas o inundadas: hidroplaneo y cierres temporales.
- Baja visibilidad: aproximaciones frustradas, desvíos y demoras.
- Drenajes, alcantarillas y plataformas pueden quedar superados.
- Operaciones terrestres más lentas y mayor exposición del personal.



Viento, tormentas y fenómenos severos

Consecuencias aeroportuarias

- Ráfagas y viento cruzado: restricciones de aproximación, aterrizaje y despegue.
- Rayos y tormentas: pausas de rampa y limitaciones para combustible, equipaje y mantenimiento.
- Cizalladura y microbursts: eventos críticos en fases de aproximación y salida.
- Mayor necesidad de vigilancia meteorológica, alertas y coordinación ATC–aeropuerto–OMA.



Corrientes en chorro y turbulencia

Efectos más allá de la pista, pero con impacto aeroportuario

¿Por qué importa al aeropuerto?

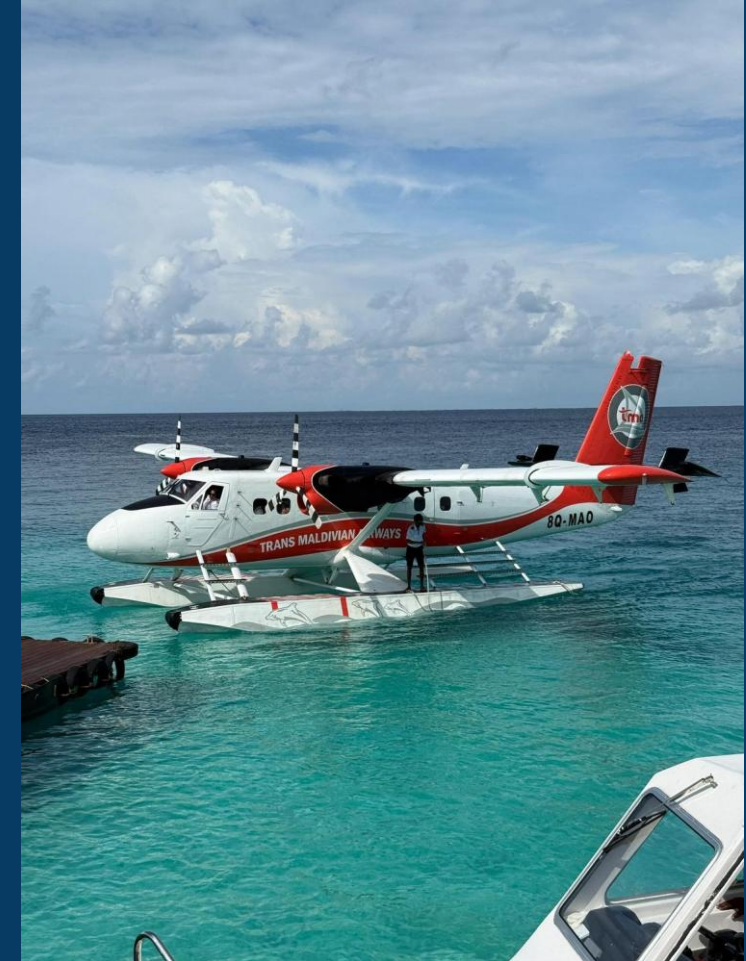


- Ajustes de rutas y niveles de vuelo pueden modificar tiempos de llegada y consumo.
- Turbulencia en aire claro puede aumentar incidentes a bordo y requerir desvíos.
- Cambios en la circulación superior pueden afectar planificación de vuelos y slot management.
- La meteorología aeronáutica debe integrar vigilancia de corto plazo con señales climáticas.

Ascenso del nivel del mar y aeropuertos costeros

Amenazas para infraestructura

- Inundación costera, marejadas y erosión en aeropuertos cercanos al litoral.
- Intrusión salina y corrosión de equipos, estructuras y sistemas eléctricos.
- Mayor presión sobre defensas costeras, drenajes y planes de evacuación.
- Necesidad de revisar vida útil de obras, cotas de diseño y redundancia operativa.



Infraestructura crítica expuesta

Pistas, plataformas, terminales y servicios

Activos que deben revisarse

- Pistas y calles de rodaje: calor, lluvia intensa y deterioro de pavimentos.
- Drenajes: capacidad frente a eventos extremos y puntos de acumulación.
- Energía y comunicaciones: redundancia ante tormentas e inundaciones.
- Terminales y accesos: continuidad del servicio para pasajeros, personal y proveedores.
- Rampa y plataformas: seguridad de personal, equipos y combustibles.



Importancia

Comprender cómo varían los parámetros meteorológicos permite:

- Optimizar la planificación operativa
- El diseño de infraestructura
- Formulación de pronósticos más precisos y adaptativos.

“La comprensión de los cambios en el sistema climático es esencial para evaluar riesgos y planificar respuestas eficaces, incluyendo infraestructuras resilientes y estrategias de adaptación.”

Fuente: IPCC (2022). *Resumen para responsables de políticas. Cambio Climático 2022: Impactos, Adaptación y Vulnerabilidad.*



Adaptación: de la amenaza al control

Gestión de riesgo climático en aeropuertos

1

Diagnosticar

Identificar amenazas climáticas, exposición, vulnerabilidad y activos críticos.

2

Priorizar

Definir puntos críticos: pista, drenaje, energía, terminal, accesos y rampa.

3

Diseñar controles

Actualizar umbrales, procedimientos, mantenimiento, continuidad y emergencia.

4

Verificar

Medir eficacia: incidentes, cierres, tiempos de recuperación y aprendizaje.



Rol de la meteorología aeronáutica

Información oportuna para decisiones operativas y estratégicas

Vigilancia

Monitoreo de tormentas, viento, visibilidad, precipitación y fenómenos severos.

Pronóstico

Productos adaptativos para planificación, turnos, rampa y operaciones aéreas.

Alertas

Comunicación clara de umbrales y posibles impactos para usuarios aeronáuticos.

Climatología

Análisis de tendencias para diseño, mantenimiento y continuidad operativa.

Rol de la meteorología aeronáutica

Información oportuna para decisiones operativas y estratégicas

Información que impulsa decisiones seguras

Conocer el tiempo también es volar más seguro

1 METAR (observación actual)

METAR MROC 201800Z **08020G35KT** **2000**
+TSRA **BKN008CB** OVC020 23/22 Q1008
WS RWY07

Claves del mensaje:

- 08020G35KT**: viento del 080° a 20 kt, ráfagas de 35 kt
- 2000**: visibilidad de 2 km
- +TSRA**: tormenta con lluvia fuerte
- BKN008CB**: cumulonimbos fragmentados a 800 ft
- WS RWY07**: cizalladura de viento en la pista 07

2 TAF (pronóstico)

TAF MROC 201730Z 2018/2118 09015KT 9999 SCT020CB BKN080
TEMPO 2020/2104 **2000** **+TSRA** **BKN010CB**
TEMPO 2020/2104 **08025G40KT**
FM210500 3000 TSRA BKN012CB
FM211200 6000 SHRA SCT015 BKN040

Interpretación resumida:

- Inicio**: condiciones operables, con CB en el área
- TEMPO 2020/2104**: periodos temporales de tormenta fuerte y visibilidad reducida
- 08025G40KT**: ráfagas de hasta 40 kt
- FM210500**: continúan tormentas y techos bajos

3 SIGMET (fenómeno significativo)

SIGMET 2 VALID 201800/202200 MROC-
MHTG FIR **SEV TS OBS** **WI** N1010 W08450 - N1000
W08400 - N0930 W08410 - N0940 W08500 - N1010 W08450
TOP FL450 **MOV W 15KT** **NC**

Qué indica:

- SEV TS OBS**: tormentas severas observadas
- WI ...**: área geográfica afectada
- TOP FL450**: topos nubosos hasta el nivel de vuelo 450
- MOV W 15KT**: se desplaza hacia el oeste a 15 kt
- NC**: sin cambio esperado a corto plazo



Situación: Se proyecta un aumento de **temperaturas extremas** que puede afectar al personal que trabaja en plataforma.

Mitigación: Reducir emisiones del aeropuerto mediante eficiencia energética y electrificación de equipos.

Adaptación: Modificar horarios, instalar zonas de sombra y establecer pausas por calor.

Resiliencia: Mantener personal de relevo y procedimientos que permitan continuar la operación durante una ola de calor.

Adaptación, Mitigación y Resiliencia



Adaptación, Mitigación y Resiliencia

Ciclo Deming	Relación principal	¿Qué se hace?	Ejemplo en un aeropuerto
Planificar	Mitigación + Adaptación	Identificar riesgos y definir medidas para reducir causas o impactos.	Analizar el aumento esperado de temperaturas y lluvias intensas; planificar iluminación LED para reducir emisiones (mitigación) y mejorar drenajes (adaptación).
Hacer	Mitigación + Adaptación	Ejecutar las medidas planificadas.	Instalar paneles solares (mitigación) y ampliar sistemas de drenaje o zonas de sombra para trabajadores (adaptación).
Verificar	Resiliencia	Evaluar si las medidas permiten mantener o recuperar la operación ante eventos adversos.	Después de una lluvia extrema, verificar si el aeropuerto mantuvo operaciones, si hubo inundaciones, retrasos o daños.
Actuar	Fortalecimiento de la resiliencia	Corregir, mejorar y actualizar las medidas según los resultados.	Si el drenaje fue insuficiente, aumentar su capacidad, modificar procedimientos y actualizar el plan de emergencia.

Riesgos

Elemento	Pregunta guía	Ejemplo
Fuente / peligro	¿Qué condición o fenómeno puede generar el riesgo?	Tormenta eléctrica, viento fuerte, baja visibilidad, wind shear
Descripción del riesgo	¿Qué podría ocurrir en la operación debido a ese fenómeno?	La baja visibilidad puede dificultar la operación segura de aeronaves y vehículos en pista y plataforma
Consecuencia	¿Cuál puede ser el resultado final?	Demoras, cierre de pista, desvíos, daños, lesiones, incidente o accidente

Lista mínima para un aeropuerto resiliente

Preguntas guía para la gestión

- ¿Cuáles amenazas climáticas afectan más la operación local?
- ¿Qué áreas se inundan primero y cuánto tarda la recuperación?
- ¿Los drenajes y pavimentos fueron diseñados para extremos actuales y futuros?
- ¿Existen umbrales claros para suspender o reiniciar operaciones de rampa?
- ¿La continuidad operativa incluye energía, accesos, comunicaciones y personal?
- ¿La información meteorológica llega a quienes toman decisiones en tiempo útil?



Mensaje final

Planificar hoy para operar con seguridad mañana

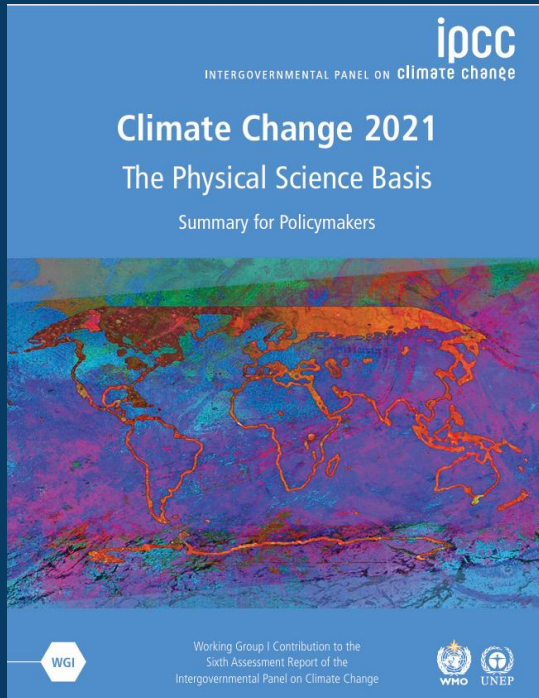
El cambio climático aumenta la presión sobre la infraestructura, la operación y la seguridad aeroportuaria. La respuesta no es solo técnica: requiere coordinación, evidencia, umbrales claros y adaptación continua.



Fuentes base sugeridas: IPCC AR6 (2021/2022); Lee et al. (2021); Williams, Storer & Joshi (2017); materiales internos de referencia IMN.

"En un cielo cada vez más turbulento, el cambio climático no solo desafía nuestra capacidad de volar, sino también nuestra capacidad de prever. La seguridad en la aviación depende hoy, más que nunca, de una meteorología resiliente, precisa y adaptativa. Porque proteger nuestros vuelos es también proteger nuestro futuro en la Tierra."





Fast upper-level jet stream winds get faster under climate change

[Tiffany A. Shaw](#) & [Osamu Miyawaki](#)

Nature Climate Change **14**, 61–67 (2024) | [Cite this article](#)

18k Accesses | 286 Altmetric | [Metrics](#)

Climate Change and the Impact of Extreme Temperatures on Aviation

E. COFFEL

Department of Earth and Environmental Sciences, Columbia University, New York, New York

R. HORTON

Department of Earth and Environmental Sciences, and Center for Climate Systems Research, Columbia University, New York, New York

(Manuscript received 8 July 2014, in final form 28 October 2014)

The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018

Dedication: This paper is dedicated to the memory of Professor Ivar S. A. Isaksen of the University of Oslo, whose scientific excellence, friendship, and mentorship is sorely missed.

[D.S. Lee](#)^a, [D.W. Fahey](#)^b, [A. Skowron](#)^a, [M.R. Allen](#)^{c,n}, [U. Burkhardt](#)^d, [Q. Chen](#)^e, [S.J. Doherty](#)^f, [S. Freeman](#)^a, [P.M. Forster](#)^g, [J. Fuglestad^h, \[A. Gettelman\]\(#\)ⁱ, \[R.R. De León\]\(#\)^a, \[L.L. Lim\]\(#\)^a, \[M.T. Lund\]\(#\)^h, \[R.J. Millar\]\(#\)^{c,o}, \[B. Owen\]\(#\)^a, \[J.E. Penner\]\(#\)^j, \[G. Pitari\]\(#\)^l, \[M.J. Prather\]\(#\)^k, \[R. Sausen\]\(#\)^d, \[L.J. Wilcox\]\(#\)^m](#)

Vol. 47: 123–138, 2011
doi: 10.3354/cr00953

CLIMATE RESEARCH
Clim Res

Published March 31

Contribution to CR Special 25 'Climate services for sustainable development'



Changes in precipitation with climate change

Kevin E. Trenberth*

National Center for Atmospheric Research, Box 3000, Boulder, Colorado 80307, USA

Fast-get-faster explains wavier upper-level jet stream under climate change

[Tiffany A. Shaw](#) & [Osamu Miyawaki](#), [Hsing-Hung Chou](#) & [Russell Blackport](#)

Communications Earth & Environment **5**, Article number: 653 (2024) | [Cite this article](#)

4016 Accesses | 23 Altmetric | [Metrics](#)

Global Response of Clear-Air Turbulence to Climate Change

[Luke N. Storer](#)¹, [Paul D. Williams](#)¹, and [Manoj M. Joshi](#)²

¹Department of Meteorology, University of Reading, Reading, UK, ²Climatic Research Unit, School of Environmental Sciences, University of East Anglia, Norwich, UK

El Niño–Southern Oscillation and Associated Climatic Conditions around the World during the Latter Half of the Twenty-First Century

Scott B. Power and François P. D. Delage

Print Publication: 01 Aug 2018

DOI: <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-18-0138.1>

Page(s): 6189–6207